

Ritmusszabályzók a mágneses rezonancia vizsgálat során

Az Aritmia és Pacemaker Munkacsoport és a Kardiovaszkuláris Képképző Munkacsoport MR-szekciójának konszenzus állásfoglalása

Szilágyi Judit¹, Makai Attila¹, Clemens Marcell², Nagy Baló Edina²,
Földesi Csaba³, Harmati Gábor⁴, Zima Endre⁵, Simor Tamás⁶, Tóth Attila⁵,
Geller László⁵, Merkely Béla⁵, Vágó Hajnalka⁵, Ságghy László¹

¹Szegedi Tudományegyetem, Általános Orvostudományi Kar, II. sz. Belgyógyászati Klinika és Kardiológiai Központ, Szeged

²Debreceni Egyetem, Klinikai Központ, Kardiológiai Intézet, Debrecen

³Gottsegen György Országos Kardiológiai Intézet, Felnőtt Kardiológiai Osztály, Budapest

⁴Állami Szívkórház, Balatonfüred

⁵Semmelweis Egyetem, Városmajori Szív- és Érgyógyászati Klinika, Budapest

⁶Pécsi Tudományegyetem, Klinikai Központ, Szívgyógyászati Klinika, Pécs

Levelezési cím:

Dr. Ságghy László, e-mail: sagghylaszlo@hotmail.com

Bevezetés

A mágneses rezonancia vizsgálat (MR) az elmúlt évtizedekben a képalkotó diagnosztika egyik alapkövévé vált a kitűnő szöveti kontrasztnak köszönhetően, amely mellett részben elkerülhetővé váltak az ionizáló sugárzással járó diagnosztikus beavatkozások. Mindemellett a ritmusszabályzó készülékek jelenléte relatív kontra-indikációt képzett a vizsgálat elvégzésében, amelynek megfelelően az American Heart Association 2007-es tudományos állásfoglalása még a pacemaker(PM)-dependens és implantálható cardioverter-defibrillátorral (ICD) élő betegek MRI-vizsgálatát kontraindikálta, kivéve rendkívül erős indikáció fennállását (1). Ezen hátrány leküzdésére az akadémiai közeg és az ipar részéről is voltak törekvések a már forgalomban lévő eszközök MR-vizsgálat alatti biztonságosságának igazolására, illetve új technológiák bevezetésére. 2008-ban a Conformité Européenne, 2011-ben pedig a Food and Drug Administration (FDA) bevezette az első MR-kondicionális készüléket.

Az 1990-es évektől azonban már számos esetiport, kohorsz- és randomizált prospektív vizsgálat igazolta, hogy az MR-vizsgálat a készülékek MR-kondicionális voltától függetlenül a haszon-kockázat mérlegelését követően megfelelő feltételek mellett biztonságosan elvégezhető. Ez tükröződik a legújabb, 2017-es Heart

Rhythm Society (HRS) szakértői konszenzus nyilatkozatban (2) is.

Jelen tájékoztató és irányelv ez utóbbi összefoglalása a hazai munkacsoportok átdolgozásával.

Definíciók és általános megfontolások

Általánosságban a vizsgálat kockázatának felmérése a következő szempontok alapján történik: a rendszer összetétele és MR-kondicionális volta, telepfeszültség és egyéb készülékparaméterek, a beteg intrinsic ritmusa és PM-dependenciája, az implantáció ideje, a vizsgált régió és az MR-vizsgálat technikai jellegzetességei. Mérlegelni kell, hogy van-e az MRI-vel egyenértékű vizsgálat/diagnosztikus eljárás, és ha nincs akkor az információ-többletből származó előnyök meghaladják-e a vizsgálat várható rizikóit.

Az „MR-kondicionális” megnevezés olyan ritmusszabályzókra vonatkozik, amelyek MR-vizsgálata meghatározott körülmények között nem okoz készülékkárosodást/diszfunkciót vagy egészségkárosodást. Egy PM/ICD csak akkor MR-kondicionális, ha minden része külön-külön is az, ugyanazon gyártótól származik, és nincsenek nem csatlakoztatott (ún. abandoned), adaptezett vagy epikardiális elektródák.

MR-vizsgálat alatt a statikus mágneses, mágneses grádiens és rádiófrekvenciás (RF) tér hatással lehet a beültethető kardiális rendszerek (cardiovascular implantable electronic device, CIED) különböző komponenseire. Ezek jelentős részét *in vitro* és állatkísérletes körülmények között vizsgálták, de esetenként klinikai tapasztalatok is rendelkezésre állnak. Ezek az alábbiakban kerülnek tárgyalásra, de előrebecsítendő, hogy a 4. és 5. pontban jelzetteket kivéve a felsorolt jelenségek bekövetkeztének inkább elméleti rizikója van, a gyakorlati megfigyelések ezeket csak a legkritikább esetben támasztották alá.

1. A rendszer elmozdulásának elméleti rizikója a mágneses tér-indukálta erő és forgatónyomaték következtében, amely a készülékek ferromágneses komponenseihez köthető. Az 1995 után gyártott készülékek nem tartalmaznak jelentős mennyiségű ferromágneses anyagot (az elektródákat MP35N ötvözet borítja), a rájuk ható mágneses erők elhanyagolhatóak, továbbá a telep elmozdulása – tekintettel a szubkután szövetben fixált helyzetére – valószínűtlen (3). A klinikai gyakorlatban esetközlések nem voltak.
2. Miokardiális depolarizáció és ritmuszavarok. *In vitro* és *in vivo* állatkísérletek (4), továbbá egy esetbemutató (5) igazolta, hogy a grádiens mágneses tér alacsony frekvenciájú elektromos áramot indukálhat az elektródákban, amely miokardiális depolarizációt okozhat következményes pitvari vagy kamrai ritmuszavarok kialakulásával.
3. A rádiófrekvenciás térnek köszönhető készülék-felmelegedés és szöveti károsodás nem MR-kondicionális CIED-ek esetén figyelhető meg. Az elektródavégteken az antennaeffektus elméletileg szövetléziókat indukálhat, amelyek az érzékelési- és ingerlési funkciókat ronthatják. *In vivo* állatmodellben azonban max. 20 °C-ig emelkedett az elektródában mért hőmérséklet, nem alakult ki hegyszövet, illetve jelentős változás a programozott paraméterekben (6).
4. A nem MR-kondicionális CIED-ek ún. Reed-kapcsolójának (mágnes felhelyezésére történő válaszáért felelős komponens) aktiválása aszinkron ingerléssel és az antitachycardia terápiák gátlásával járhat. Több mint egy évtizede azonban bevezetésre kerültek a hagyományos Reed-kapcsoló alternatívái (pl. digitális Reed-kapcsoló, Hall-szenzor), amelyek működése erős mágneses térben is megbízható és szövődményeket ezek alkalmazása mellett nem közöltek.
5. Az EMI (nagy energiájú elektromágneses interferencia) lehetséges hatásai:
 - a: Power on reset: a CIED visszaállása egy backup demand módba, amely gyártónként eltérhet (pl. váltás bipoláris pacelésből unipolárisba, az érzékelés és terápia megváltozása).
 - b: Az EMI okozta téves érzékelés (oversensing) a szükséges ingerlés elmaradását vagy ICD esetében téves tachycardia detekciót okozhat.

c: EMI hatására tranziens telepfeszültség csökkenés alakulhat ki, amelyből eleve alacsony kiinduló feszültség esetén a telep esetlegesen nem regenerálódik.

6. Biventrikuláris készülékek esetén a reszinkronizációs funkció kikapcsolásával elméleti rizikó a hemodinamikai státusz romlására.

Evidenciák MR-kondicionális és nem MR-kondicionális készülékekkel történő MR-vizsgálatok biztonságossága mellett

Több prospektív, multicentrikus, randomizált (7, 8, 9) és prospektív, multicentrikus kohorsz vizsgálat (10, 11, 12) történt MR-kondicionális készülékekre. Az eddigi vizsgálatok többsége 1.5 T-s MRI-készülékekkel készült a CIED implantációja utáni szokványos (általában 9-12 hét) várakozási idő után. Az „EnRhythm” vizsgálatban egyetlen beteg esetében tapasztaltak stimulációs küszöbemelkedést, amely ingerlési inhibíciót nem okozott, továbbá néhány beteg a készülék felmelegedéséről és a CIED feletti bőr paresztéziájáról számolt be (8). ICD-k tesztelése során (pl. Medtronic Evera) (13) az említett végpontok mellett (0% szövődmény) 24 betegnél sikeres defibrillációs tesztelés is történt, Biotronik Ichora ICD-k vizsgálatokor 1/153 esetben regisztráltak készülék diszfunkciót nem okozó csökkent R-hullám amplitúdót.

Egy közelmúltban közölt, 5099 nem MR-kondicionális PM-mel és ICD-vel rendelkező beteg bevonásával készült metaanalízisben 98 adverz eseményt regisztráltak: elektróda-diszfunkció (n=3, a leírások alapján nem egyértelműen igazolható az MR kauzalitása), power on reset (n=94, 2006 előtt gyártott készülékeknél kizárólag), inadekvát ingerlés (n=11), ICD sokk/antitachycardia terápia (n=1), továbbá 17 esetben jeleztek panaszt a betegek (leginkább az aszinkron módnak köszönhető palpitációs panaszok). A metaanalízisbe hátrahagyott és epikardiális elektródákkal, ideiglenes PM-mel, továbbá szubkután ICD-vel rendelkező betegek is bevonásra kerültek, 773 beteg esetében a torakális régiót vizsgálták, illetve 105 esetben 3 T-s vizsgálat történt (14). Hátrahagyott elektródák jelenléte az elektróda felmelegedésének és az aritmiák indukciójának rizikóját emelte *in vitro* közegben, azonban Padmanabhan és munkatársai 2017-es prospektív vizsgálatában CIED-diszfunkció, fájdalom, aritmiák vagy Troponin-T emelkedés nem jelentkezett az MRI kapcsán (15). Hartnell és szerzőtársai epikardiális elektródákkal kapcsolatban sem igazoltak jelentős készülékfelmelegedést vagy panaszt (16). Pulver közlése alapján az összes bevont epikardiális elektródákkal élő, nem pacemaker-dependens kongenitális szívbeteg (n=11) 1.5 T-s MR-vizsgálata (4 esetben szív MR) diagnosztikus értékű és szövődménymentes volt (17). Beültethető ritmusszabályzók 3 T-s MR-vizsgálatával

kapcsolatban több publikáció is rendelkezésre áll. *Naehle* által közölt 41 nem pacemaker-dependens beteg 51 koponya-MR-vizsgálata szövödménymentesen zajlott (18); *Gimble* és *munkatársai* pacemaker-dependens betegeket is bevontak vizsgálatukba, továbbá több anatómiai régióról készült MRI adverz események nélkül (19).

A jelenleg forgalomban lévő ILR-ek (Implantable Loop Recorder) MR-kompatibilisnek tekinthetők, így ezen betegek 1.5T-s, illetve 3 T-s MR-vizsgálata is biztonságosan elvégezhető. Javasolt azonban az ILR lekérdezése a vizsgálat előtt tekintettel arra, hogy az ILR asystoliára, tachycardiára emlékeztető műtermékeket regisztrálhat, és ezek a memóriakorlátok miatt a korábban regisztrált, valós események törlődéséhez vezethetnek (20, 21).

Ajánlás a CIED-del rendelkező betegek MR-vizsgálatával kapcsolatos teendőkre

A HRS 2017-es ajánlását alapul véve az alábbiakban foglaltuk össze az MR-vizsgálatot indikáló és szervező orvos, az elektrofiziológus és az MR-vizsgálatot végző orvos által elvégzendő feladatokat.

- MR-vizsgálati indikáció felállítása, amelynek során tisztázandó, hogy felmerül-e olyan másik képalkotó eljárás, amely hasonló minőségű információt szolgáltat, de még a fent jelzett minimális mértékben sem merülnek fel biztonsági kérdések.
- A haszon-kockázat mérlegelése elektrofiziológus bevonásával, a következő megfontolásokkal:
 - az implantált rendszer komponenseinek felmérése, MR-kondicionális voltának megállapítása és a készülék részletes lekérdezése. Az elektrofiziológiai véleményben meghatározandó a készülékkel és a beteggel kapcsolatos további teendők milyensége és ütemezése.
 - 6 héten belüli implantáció, hátrahagyott/epikardiális/törött elektródák vagy a tervezett MR-vizsgálat >1.5 T: nincs egyértelmű ajánlás, de az eddigi vizsgálatok alapján biztonságos, és kellőképpen megalapozott indikáció esetén elvégezhető.
- A vizsgálat előtti és alatti általános teendők és a vizsgálat időpontjának megbeszélése:
 - Az MR-vizsgálat NE ügyeleti időben történjen.
 - Szükség van-e a készülék programozásában és/vagy Advanced Cardiac Life Supportban (ACLS) jártas személy jelenlétére? – az MR-vizsgálatot kérő és szervező orvos felelőssége ennek megszervezése a már rendelkezésre álló elektrofiziológiai véleményben meghatározottak szerint.
 - EKG és pulzoxymetria minden beteg esetében szükséges az MR-vizsgálat ideje alatt.
 - ICD-s betegnél szoros EKG-monitorozás javasolt az ICD-terápiák visszakapcsolásáig, defibrillátor a helyszínen kell legyen.

1. TÁBLÁZAT. A nem MRI kondicionális CIED MR-vizsgálat előtt kikapcsolandó adaptív és fejlett funkciói

Rate-response mód
Antitachycardia terápiák
LV-triggerelt pacelés biventrikuláris készülékekben
PMT-algoritmus
PVC- és PAC-triggerelt pace válasz
Rate smoothing, overdrive pacing és Conducted AF Response (CAFR) pitvarfibrillációban
Hysteresis pacelés
Magnet response
Noise response

- Konvencionális PM esetén is javasolt a szoros megfigyelés, illetve monitorozás az eredeti program visszaállításáig.
 - A pacemaker gyártójának és típusának, valamint az elektródák típusának pontos dokumentációja rendelkezésre kell, álljon az MR-vizsgálatot végző orvos számára is, mivel ez a mérési beállításokat befolyásolhatja.
- Készülékprogramozási és specifikus egyéb teendők közvetlenül az MR-vizsgálat előtt és alatt:
 - MR-kondicionális készülék, PM-dependenciától függetlenül:
 - MRI-mód aktiválása (egyéb beállítások dependenciától függenek).
 - Defibrillátor az MR-vizsgáló előterében kell legyen.
 - A beteg monitorozása szükséges az ICD-terápiák visszakapcsolásáig.
 - PM-es és ICD-s betegek esetében CIED-programozásra alkalmas személyzet elérhető kell legyen a helyi elektrofiziológiai szabályozással összhangban, reszuscitációban jártas személyzet pedig a helyszínen kell tartózkodjon a vizsgálat PM/ICD által nem monitorozott ideje alatt.
 - Nem MR-kondicionális készülék, nem PM-dependens beteg:
 - Nem ingerlő módba (OVO, ODO) vagy „inhibited” módba (VVI, DDI) történő programozás az adaptív és az egyéb fejlett funkciók kikapcsolásával (1. táblázat).
 - ICD-terápiák kikapcsolása és a beteg folyamatos MR-kondicionális EKG és pulzoxymetriával történő monitorozása a visszakapcsolásig.
 - A helyszínen legyen jelen reszuscitációban jártas személyzet.
 - Defibrillátor/külső pacemaker és programozó a vizsgáló előterében, amennyiben reszuscitációra kerül sor, a beteget a vizsgáló előterébe kell hozni, evakuációs gyakorlat javasolt.
 - PM/ICD-programozásban jártas személyzet azonnali elérhetőségének biztosítása.
 - Nem-MR kondicionális készülék, PM-dependens

beteg (40/min alatti saját frekvencia, vagy 40/min fölötti, de ülő helyzetben gyenge/szédül/presyncope).

- Aszinkron módba történő programozás (VOO, DOO), magasabb frekvencia választása a kompetitív ingerlés elkerülésére, az adaptív és fejlett funkciók kikapcsolása.
- ICD-terápiák kikapcsolása és a beteg folyamatos MR-kondicionális EKG és pulzoxymetriával történő monitorozása a visszakapcsolásig.
- Konvencionális PM esetén is javasolt a szoros megfigyelés, illetve monitorozás az eredeti program visszaállításáig.
- Defibrillátor/külső pacemaker és programozó az MRI-vizsgálóban (4-es zónán kívül), amennyiben reszuscitációra kerül sor, a beteget a vizsgáló előterébe kell hozni, evakuációs gyakorlat javasolt.
- PM/ICD-programozásban és reszuscitációban jártas személyzet a helyszínen kell tartózkodjon.
- Transzvéns PM-implantációban jártas személy azonnal elérhető kell, hogy legyen.

5. MRI után a CIED ismételt lekérdezése és az eredeti programozás visszaállítása.
6. Soron kívüli follow-up a PM/ICD Ambulancián 3-6 hónappal a vizsgálat után, azonban amennyiben a stimulációs küszöb 1 V-tal emelkedik, az érzékelés 50%-kal romlik, illetve a pace impedancia 50 Ω -mal, a sokk impedancia 5 Ω -mal változik, 1 héten belül.
7. Az idézett dokumentum nem rendelkezik sürgősségi MR-vizsgálatok esetén szükséges teendőkről. A szerzők véleménye ebben a kérdésben az, hogy alapos haszon-kockázat mérlegelést követően az MR-vizsgálatok sürgősségi helyzetben elvégezhetőek, de ebben az esetben fokozott mértékben érvényesek a beteg vizsgálata alatti monitorozására vonatkozó utasítások. Továbbá ilyenkor is szükséges teljes reanimációs készség, illetve az ebben jártas személyzet helyszínen tartózkodása. A vizsgálatot követően is azonban a fokozott monitorozás szükséges lehet és mielőbb javasolt az implantáló intézménnyel történő kapcsolatfelvétel és a lehető leghamarabbi időpontban történő készülékprogramozás-ellenőrzés.

Következtetések

Egyre több evidencia áll rendelkezésre a ritmusszabályzóval élő betegek MR-vizsgálatának biztonságosságával kapcsolatban.

A korábbi, leginkább esetiportokban közölt adverz események jelentős része a régebbi, jelentősebb ferromágneses anyag tartalmú és hagyományos Reed-kapcsolóval rendelkező készülékek esetén fordultak elő, illetve olyan esetekben, amikor a beteg CIED-hordozó státusza nem derült ki a vizsgálat előtt.

A 2017-es HRS szakértői konszenzus nyilatkozatban még relatív kontraindikáció a hátrahagyott, epikardiális, törött elektródák jelenléte, azonban tekintettel a közelmúltban megjelent kedvező kimenetelű publikációkra, az ajánlások változása itt is várható.

Jelen álláspont szerint tehát az akár MR-kondicionális, akár nem MR-kondicionális PM/ICD-vel élő betegek MR-vizsgálata az említett intézkedések betartásával biztonságosan elvégezhető, érdemi rizikóval gyakorlatilag nem jár. A társszakmák összefogásával a szerzők szándéka szerint egyre több beteg számára lesz elérhető az eddig sok esetben alaptalanul kockázatosnak vélt, de nagy diagnosztikus értékű vizsgálat.

Irodalom

1. Levine GN, Gomes AS, Arai AE, et al. Safety of magnetic resonance imaging in patients with cardiovascular devices: an American Heart Association scientific statement from the Committee on Diagnostic and Interventional Cardiac Catheterization, Council on Clinical Cardiology, and the Council on Cardiovascular Radiology and Intervention: endorsed by the American College of Cardiology Foundation, the North American Society for Cardiac Imaging, and the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance. *Circulation* 2007; 116: 2878–2891.
2. 2017 HRS expert consensus statement on magnetic resonance imaging and radiation exposure in patients with cardiovascular implantable electronic devices Indik, Julia H, et al. *Heart Rhythm* 2017; 14(7): e97–e153.
3. Luechinger R, Duru F, Scheidegger MB, Boesiger P, Candinas R. Force and Torque Effects of a 1.5-Tesla MRI Scanner on Cardiac Pacemakers and ICDs. *PACE* 2001; 24: 199–205.
4. Tandri H, Zviman MM, Wedan SR, Lloyd T, Berger RD, Halperin H. Determinants of gradient field induced current in a pacemaker lead system in a magnetic resonance imaging environment. *Heart Rhythm* 2008; 5: 462–468.
5. Fontaine JM, Mohamed FB, Gottlieb C, et al. Rapid ventricular pacing in a pacemaker patient undergoing magnetic resonance imaging. *Pacing Clin Electrophysiol* 1998; 21: 1336–1339.
6. Luechinger R, Zeijlemaker VA, Pedersen EM, Mortensen P, Falk E, Duru F, Candinas R, Boesiger P. In vivo heating of pacemaker leads during magnetic resonance imaging. *Eur Heart J* 2005 Feb; 26(4): 376–83.
7. Gimbel JR, Bello D, Schmitt M, Merkely B, Schwitter J, Hayes DL, Sommer T, Schloss EJ, Chang Y, Willey S, Kanal E, Advise, M. R. I. System Study Investigators. Randomized trial of pacemaker and lead system for safe scanning at 1.5 Tesla. *Heart Rhythm* 2013; 10(5): 685–691.
8. Wilkoff BL, Bello D, Taborsky M, Vymazal J, Kanal E, Heuer H, Hecking K, Johnson WB, Young W, Ramza B, Akhtar N, Kuepper B, Hunold P, Luechinger R, Puererfellner H, Duru F, Gotte MJ, Sutton R, Sommer T, EnRhythm, M. R. I. SureScan Pacing System Study Investigators. Magnetic resonance imaging in patients with a pacemaker system designed for the magnetic resonance environment. *Heart Rhythm* 2011; 8(1): 65–73.
9. Gold MR, Sommer T, Schwitter J, Al Fagih A, Albert T, Merkely B, Peterson M, Ciuffo A, Lee S, Landborg L, Cerkenvenik J, Kanal E, Evera, M. R. I. Study Investigators. Full-Body MRI in Patients With an Implantable CardioverterDefibrillator: Primary Results of a Randomized Study. *J Am Coll Cardiol* 2015; 65(24): 2581–2588.
10. Bailey WM, Mazur A, McCotter C, Woodard PK, Rosenthal L, Johnson W, Mela T, Pro, M. R. I. Study Investigators. Clinical safety of the ProMRI pacemaker system in patients subjected to thoracic

spine and cardiac 1.5-T magnetic resonance imaging scanning conditions. *Heart Rhythm* 2016; 13(2): 464–471.

11. Savoure A, Mechulan A, Burban M, et al. The Kora pacemaker is safe and effective for magnetic resonance imaging. *Clin Med Insights Cardiol* 2015; 9: 85–9.

12. Bailey WM, Rosenthal L, Fananapazir L, Gleva M, Mazur A, Rinaldi CA, Kypta A, Merkely B, Woodard PK, ProMRI/ProMRI AFFIRM Study Investigators. Clinical safety of the ProMRI pacemaker system in patients subjected to head and lower lumbar 1.5-T magnetic resonance imaging scanning conditions. *Heart Rhythm* 2015; 12(6): 1183–1191.

13. Gold MR, Sommer T, Schwitter J, Al Fagih A, Albert T, Merkely B, Peterson M, Ciuffo A, Lee S, Landborg L, Cerkenik J, Kanal E, Evera, M. R. I. Study Investigators. Full-Body MRI in Patients With an Implantable CardioverterDefibrillator: Primary Results of a Randomized Study. *J Am Coll Cardiol* 2015; 65(24): 2581–2588.

14. Shah AD, Morris MA, Hirsh DS, Warnock M, Huang Y, Mollerus M, Merchant FM, Patel AM, Delurgio DB, Patel AU, Hoskins MH, El Chami MF, Leon AR, Langberg JJ, Lloyd MS Magnetic resonance imaging safety in nonconditional pacemaker and defibrillator recipients: A meta-analysis and systematic review. *Heart Rhythm* 2018 Feb 17. pii: S1547-5271(18)30129-2

15. Padmanabhan D, Kella DK, Mehta R, Kapa S, Deshmukh A, Mulpuru S, Jaffe AS, Felmlee JP, Jondal ML, Dalzell CM, Asirvatham SJ, Cha YM, Watson RE Jr, Friedman PA. Safety of magnetic resonance imaging in patients with legacy pacemakers and defibrillators

and abandoned leads. *Heart Rhythm* 2018 Feb; 15(2): 228–233. doi: 10.1016/j.hrthm.2017.10.022. Epub 2017 Oct 16.

16. Hartnell GG, Spence L, Hughes LA, Cohen MC, Saouaf R, Buff B. Safety of MR imaging in patients who have retained metallic materials after cardiac surgery. *AJR Am J Roentgenol* 1997 May; 168(5): 1157–9.

17. Pulver AF, Puchalski MD, Bradley DJ, et al. Safety and imaging quality of MRI in pediatric and adult congenital heart disease patients with pacemakers. *Pacing Clin Electrophysiol* 2009; 32: 450–456.

18. Naehle CP, Meyer C, Thomas D, Remerie S, Krautmacher C, Litt H, Luechinger R, Fimmers R, Schild H, Sommer T. Safety of Brain 3-T MR Imaging with Transmit-Receive Head Coil in Patients with Cardiac Pacemakers: Pilot Prospective Study with 51 Examinations. *Radiology* 2008 Dec; 249(3): 991–1001. doi: 10.1148/radiol.2493072195

19. Gimbel JR. Magnetic Resonance Imaging of Implantable Cardiac Rhythm Devices at 3.0 Tesla. *PACE* 2008; 31: 795–801.

20. Gimbel JR, Zarghami J, Machado C, et al. Safe scanning, but frequent artifacts mimicking bradycardia and tachycardia during magnetic resonance imaging (MRI) in patients with an implantable loop recorder (ILR). *Ann Noninvasive Electrocardiol* 2005; 10(4): 404–408.

21. Haeusler KG, Koch L, Ueberreiter J, et al. Safety and reliability of the insertable Reveal XT recorder in patients undergoing 3 Tesla brain magnetic resonance imaging. *Heart Rhythm* 2011; 8(3): 373–376.